塔里木河下游不同地下水埋深下胡杨水分利用来源研究

蒋晓晴[1,2]， 郝 帅[1,2]， 叶 茂[1,2]， 何定学[1,2]， 张子涵[1,2]， 李国华[1,2]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；2. 新疆师范大学干旱区湖泊环境与资源实验室，新疆 乌鲁木齐 830054）

摘 要： 地下水和土壤水是干旱区荒漠植被生长的决定因子，荒漠植被的水分利用是干旱区生态水文过程的重要环节。为更好地了解荒漠植被对水分的利用，采用氢氧稳定同位素技术，结合贝叶斯混合模型（MixSIAR），解析不同地下水埋深下不同林龄胡杨的吸水来源。结果表明：（1）土壤水$\delta^{18}O$和δD值随土壤深度的增加而减小，随离岸距离的增加而增大；中龄胡杨木质部水$\delta^{18}O$和δD值变化幅度最大，老龄胡杨次之，幼龄胡杨最小；地下水$\delta^{18}O$和δD值随离岸距离的增加而减小。（2）不同地下水埋深不同林龄胡杨的最大吸水层位均为地下水，其次为深层土壤水，靠河岸的胡杨可以直接利用河水。地下水埋深为1.98~2.10 m、1.95~2.21 m、2.49~2.61 m、3.51~3.73 m、4.66~4.73 m时，老龄胡杨对地下水的利用比例分别为18.4%、19.6%、17.8%、23.1%、21.9%，中龄胡杨为16.7%、17.6%、16.7%、21.4%、21.6%，幼龄胡杨为16.0%、16.6%、19.9%（埋深2.49~2.61 m和4.66~4.73 m样地无幼苗）。（3）地下水埋深随离岸距离的增加而增大；土壤含水量和土壤盐度随离岸距离的增加而减小，随土壤深度的增加而增大；胡杨对水源的利用比例随土壤含水量和盐度的增加而增大。探究不同地下水埋深下胡杨水分利用来源，为塔里木河下游荒漠河岸林的生态恢复提供理论支撑。

关 键 词： 氢氧稳定同位素；MixSIAR模型；水分来源；地下水埋深；胡杨；塔里木河下游

文章编号： 1000－6060(2024)12－2017－13(2017～2029)

水是植物生长和分布的重要驱动因素之一，特别是土壤水和地下水对荒漠植被的生长发育起决定性作用。在全球气候变暖与日益频繁的农业灌溉等人类活动的影响下，干旱区地表水蒸发速率加快，地下水位下降[1]，区域植物水分利用来源逐渐转向更深层土壤水或地下水[2-3]。因此，探究干旱区植物水分利用来源，有利于加深对干旱区生态水文过程的认识，对维护干旱区水资源管理有重要现实意义。

目前，对植物水分利用来源划分的传统方法有全根系挖掘法、树干液流法和植物水势法等，虽然实验操作较为便捷，但存在局限性。全根系挖掘法耗时耗力，对植被损害严重[4]；树干液流技术和植物水势法通过即时植物生理指标进行判断，不能精确计算潜在水源的贡献率[5-6]。稳定同位素技术被认为是一种高效的研究手段，因为植物在吸水过程中，同位素一般不发生分馏[7-8]，将植物木质部水与潜在水源相比较，能精准确定植物水分来源。

氢氧稳定同位素技术和同位素混合模型在估算干旱区荒漠植被水分来源研究中被广泛应用，已有的研究发现，荒漠植被的水分来源在季节变化、不同生长时期以及不同树种之间均表现出差异性。季节变化上，李荣磊等[9]利用稳定同位素方法，研究表明沙柳在旱季主要利用深层土壤水和地下

收稿日期： 2024-04-01； **修订日期：** 2024-07-20

基金项目： 新疆维吾尔自治区高校科研计划项目（XJEDU2022P065）；新疆维吾尔自治区重点实验室招标课题（XJDX0909-2021-02）；新疆维吾尔自治区自然科学基金项目（2021D01A118）；国家自然科学基金项目（42161004）资助

作者简介： 蒋晓晴（2000-），女，硕士研究生，主要从事干旱区水文过程等方面的研究. E-mail: jiangxq916@163.com

通讯作者： 郝帅（1982-），男，副教授，硕士生导师，主要从事干旱区水文过程等方面的研究. E-mail: haoshuai1869@163.com

水,在雨季逐渐转变为吸收浅层土壤水;Qiu等[10]运用稳定同位素技术分析得出,白刺灌木在输水期对深层土壤水和降水的利用比例增加;赵鹏等[11]研究表明不同衰退阶段多枝柽柳春季对降水的平均利用比例较高,且春季到秋季衰退多枝柽柳灌丛趋向于利用可靠的深层地下水。不同生长时期变化上,刘树宝[12]研究发现黑河下游成熟和过熟胡杨对深层土壤水的利用比例较高。李涛等[13]利用多源线性混合(IsoSource)模型得出不同生长阶段的胡杨对河水的利用比例随径级的增加而增加;万彦博等[14]运用IsoSource模型得出,幼龄胡杨主要吸水层位为表层土壤水,成熟和过熟胡杨吸水层位受地下水埋深干扰较小。不同树种间,王玉阳等[15]利用稳定同位素技术,发现胡杨和柽柳对深层土壤水和地下水利用比例较大,甘草和骆驼刺对表层土壤水利用比例较大;Ma等[16]利用MixSIAR模型得出不同树种间的土壤水分利用率差异显著。以上研究表明,现有对胡杨吸水来源的研究多关注于不同林龄、不同离岸距离的水分利用来源变化,在不同地下水埋深下结合MixSIAR模型对不同林龄胡杨水分利用来源的研究亟待深化。

胡杨(*Populus euphratica*)是塔里木河下游的优势建群种,对绿洲防护和保障人类生产生活有重要意义。自2000年国家生态输水工程开展以来,下游胡杨生态环境逐渐恢复,但胡杨群落仍处于衰败退化阶段,仅有少量幼龄胡杨生存于河岸旁,地下水位较低[17]。因此,本研究为解析塔里木河下游荒漠河岸林的水分利用来源,运用稳定同位素示踪法和MixSIAR模型,量化胡杨各潜在水源的贡献比例,目的是:(1) 分析各潜在水源的氢氧稳定同位素组成变化特征;(2) 探究不同地下水埋深下不同林龄胡杨的主要吸水层位、对潜在水源的利用比例;(3) 分析土壤理化性质和地下水埋深对不同林龄胡杨水分利用来源的影响,以期为塔里木河下游不同林龄胡杨的生态修复和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以塔里木河下游的昆阿斯特断面(40°24′25.20″N,87°50′56.40″E)和英苏断面(40°21′39.60″N,88°03′36.00″E)作为研究区(图1),属于典型的暖温带大陆性干旱气候,年平均降水量小于15 mm,年平均气温为9~11 ℃,年潜在蒸发量高达2500~3000 mm[18]。植物群落主要由胡杨、多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、花花柴(*Karelinia caspia*)等共同组成。研究区胡杨群落在河岸两旁均有分布,但远离河岸的胡杨群落仅有中老龄胡杨生存。

1.2 样品采集及处理

于2023年9月26—28日在塔里木河下游,按地下水监测井分布,分别在昆阿斯特断面和英苏断面内设置离河0~5 m、200~210 m、400~410 m和0~5 m、800~810 m、2990~3000 m 6个样地。其中昆阿斯特断面样地二为胡杨幼苗种植试验田区,常有地下水灌溉,出现盐结皮(图2);英苏断面样地三内有大片胡杨幼苗(图3)。在每个样地中分别选取幼龄、中龄和老龄胡杨,共计16株样木,其中幼龄4株、中龄6株、老龄6株(样木基本信息见表1)。

1.2.1 土壤样品采集 在已选样木下,使用直径5 cm的土钻,从土壤表层开始,每间隔20 cm为一层,每层采集2份样品,对0~200 cm的土壤连续取样,靠河岸样地取至潜水层,共收集135组土壤样品。一部分装入样品瓶内,拧紧瓶盖后用Parafilm封口膜密封,带回实验室-20 ℃冷冻保存,直至土壤水分抽提和稳定同位素组成测定。一部分装入铝盒后盖紧盖子,立即称量土壤湿重,带回实验室测定土壤含水量。

1.2.2 植物样品采集 为避免蒸发作用的影响,采样时间均在上午8:00—10:00进行,用修枝剪截取3~5 cm无病虫害、未受人为干扰的样木茎干非绿色栓化小枝,迅速剥离其韧皮部并装入样品瓶,拧紧瓶盖后用Parafilm封口膜密封,带回实验室后立即进行植物水分抽提和稳定同位素组成测定,共采集植物样品16个。

1.2.3 地下水和河水样品采集 地下水样品采自于样地周围的地下水监测井,共收集地下水样12组;河水取自临近样地的河流,共收集河水样品2组,每个样品采集2次。每次采集样品前均利用样品水润洗样品瓶3次,水样装满样品瓶后拧紧瓶盖,用Paraflim封口膜密封。带回实验室用0.45 μm醋酸纤维素滤膜过滤后装入1.5 mL样品瓶内,放入冰箱2 ℃冷藏保存直至稳定同位素组成测定。

(a) 塔里木河流域
图例
研究区
河流
湖泊
高程/m
8464
−188
N
博斯腾湖
开都河
孔雀河
昆阿斯特
英苏
大西海子水库
台特玛湖
塔里木河
阿克苏河
喀什噶尔河
叶尔羌河
和田河
车尔臣河
天山
阿尔金山
昆仑山
0　200 km

图例
高程/m
(b) 昆阿斯特断面
N
监测井
采样点
河流
8464
−188
塔里木河
DW1
DW2
DW3
样地一
样地二
样地三
0　0.2 km

(c) 英苏断面
N
其文阔尔
样地三
图例
监测井
采样点
河流
Y–F1
Y–F3
Y–F4
Y–F5
高程/m
8464
−188
塔里木河
Y–F6
Y–F7
Y–F8
样地二
Y–F10
Y–F11
样地一
0　0.7 km

图1　研究区及采样点概况图

Fig. 1　Overview map of the study area and sampling sites



图2　昆阿斯特断面样地二的试验田

Fig. 2　Test plots in sample plot II of the Kunast section



图3　英苏断面样地三的胡杨幼苗

Fig. 3　Young *Populus euphratica* in sample plot III of the Yingsu section

表1 样木基本信息

Tab. 1 Basic information of sample wood

样地名称	样地编号	样木编号	离岸距离/m	地下水埋深/m	林龄	树高/m	冠幅/m(南北×东西)	胸径(DBH)/cm
昆阿斯特断面	样地一	K1-1	0~5	1.95~2.21	幼龄	1.4	1.8×1.6	6.2
		K1-2			中龄	8.1	3.8×3.3	16.8
		K1-3			老龄	8.9	4.1×3.8	24.3
	样地二	K2-1	200~210	3.51~3.73	幼龄	2.8	2.3×1.9	5.4
		K2-2			中龄	4.2	3.9×3.6	16.1
		K2-3			老龄	8.2	8.9×8.5	56.4
	样地三	K3-1	400~410	4.66~4.73	中龄	8.1	2.5×2.3	15.2
		K3-2			老龄	10.2	3.1×3.4	52.9
英苏断面	样地一	Y1-1	0~5	2.49~2.61	中龄	5.2	4.2×3.8	10.2
		Y1-2			老龄	10.7	6.8×7.0	26.5
	样地二	Y2-1	800~810	3.75~4.67	幼龄	4.2	2.7×2.4	7.5
		Y2-2			中龄	5.5	2.8×3.1	15.8
		Y2-3			老龄	7.7	3.2×3.3	26.4
	样地三	Y3-1	2900~3000	1.98~2.10	幼龄	1.4	1.8×1.5	3.4
		Y3-2			中龄	6.1	3.8×3.7	17.2
		Y3-3			老龄	8.0	3.9×4.2	25.1

注:样木编号中字母代表采样点断面编号,第1个数字代表样地编号,第2个数字代表样地内不同样木。参考王世绩等[19]依据胡杨胸径(DBH)大小,划分为:幼龄胡杨(DBH≤9 cm)、中龄胡杨(9 cm<DBH≤17 cm)和老龄胡杨(DBH>17 cm)。

1.3 研究方法

1.3.1 样品水分抽提及氢氧稳定同位素组成测定 样品水分抽提及氢氧稳定同位素组成测定在新疆师范大学干旱区湖泊环境与资源实验室完成。所有水样在进行稳定氢氧同位素测定前均需经过0.45 μm醋酸纤维素滤膜过滤。植物和土壤水分采用全自动真空冷凝抽提系统(LI-2100,北京理加公司)抽提,氢氧稳定同位素组成利用液态水稳定同位素分析仪(LGR DLI-100,Los Gatos Research,Mountain View,USA)测定。为了提高植株水δ^2H和δ^{18}O值测试的精度,本文将测定的植物水同位素组成采用拟合的有机物校正曲线进行校正[20-21],使得有机物对测定结果的影响在可允许的误差范围内存在。测得的氢氧稳定同位素组成为维也纳标准平均大洋水(V-SMOW)的千分偏差表示:

$$\delta(‰)=\frac{R_{sample}-R_{standard}}{R_{standard}}\times 1000 \tag{1}$$

式中:R_{sample}为水样的^{2}H或^{18}O的同位素比率;$R_{standard}$为标准样品的^{2}H或^{18}O的同位素比率;δ^2H和δ^{18}O值的检测精度分别为0.5‰和0.15‰。

1.3.2 MixSIAR模型及不确定性分析 贝叶斯混合模型MixSIAR是运行于R语言里的一个安装包,用以定量确定各潜在水源对植物水分的贡献率。在接受模型最终的输出前,需要运行Gelman-Rubin和Geweke诊断检验判定模型是否接近收敛,Geweke诊断结果中结果外数量<5%±1.96、Gelman-Rubin在诊断结果显示均为0,即为收敛[22-23],本文MCMC运行步长设置为"extreme"时,模型收敛。

通过模型评价指标均方根误差(Root mean square error,RMSE)来衡量模型计算结果的适用性[24-26],计算公式如下:

$$p_i=\sum_{i=1}^{n}f_i\delta_A \tag{2}$$

$$\mathrm{RMSE}=\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(p_i-o_i\right)^2\right]^{1/2} \tag{3}$$

式中:p_i为植物木质部水同位素比率的预测值;n为植物水源个数;i为植物水源;f_i为使用模型计算的第i个水源的贡献比率;δ_A为每个潜在水源的同位素值;o_i为植物木质部水同位素比率的观测值。

1.3.3 土壤含水量和盐度测定 土壤含水量采用烘干法测定。将采集的土壤样品放入烘箱内105 ℃恒温烘干24 h,烘至恒重后进行称量,计算土壤含水量。土壤盐度使用电导率仪(Multi 3420 Set B,WTW GmbH,Germany)测定。

2　结果与分析

2.1　地下水埋深和土壤理化性质变化特征

如图4所示，随离岸距离的增加，昆阿斯特断面监测井地下水埋深从1.95 m增至4.73 m，变化幅度为2.78 m；英苏断面从2.10 m增至5.18 m，变化幅度为3.08 m，其中Y-F11靠近塔河支流，地下水埋深较浅。

土壤含水量随离岸距离的增加而逐渐降低，随土壤深度的增加而增大。如图5所示，昆阿斯特断面样地一、二、三0~40 cm土层的平均土壤含水量分别为2.90%、1.56%、0.20%；40~120 cm分别为11.04%、4.13%、1.71%；120~200 cm分别为20.56%、3.06%、1.59%。英苏断面样地一、二、三0~40 cm土层平均土壤含水量分别为4.52%、0.14%、16.62%；

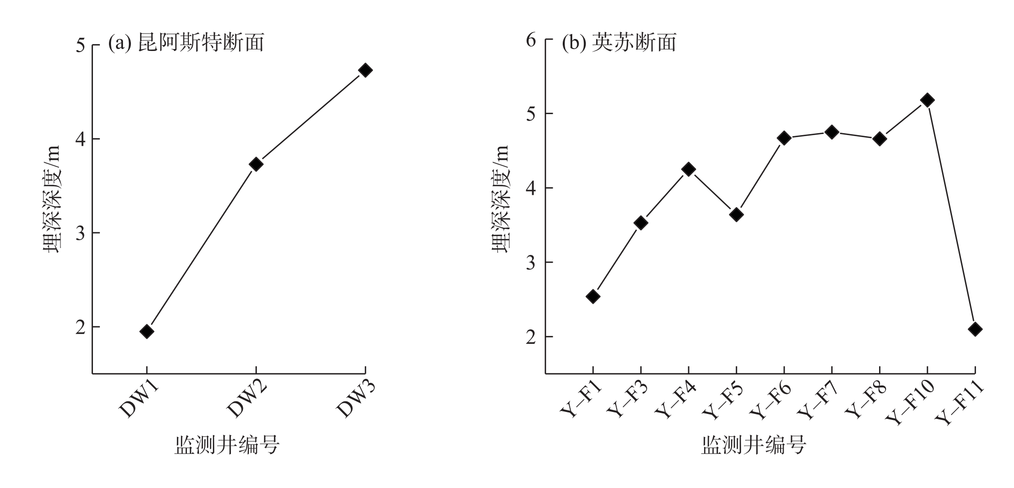


图4　昆阿斯特断面和英苏断面监测井地下水埋深

Fig. 4　Groundwater depth at monitoring wells at the Kunast and Yingsu sections

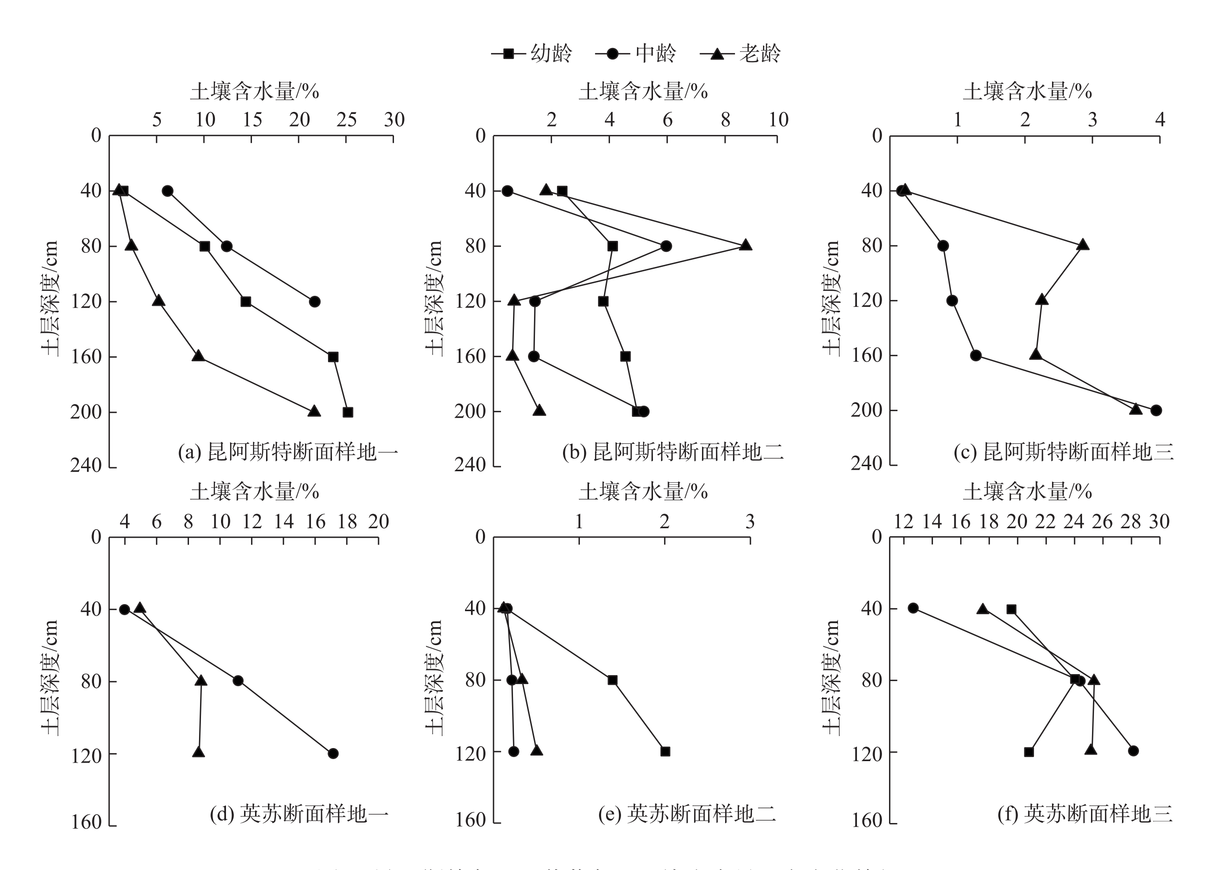


图5　昆阿斯特断面和英苏断面土壤含水量垂向变化特征

Fig. 5　Characteristics of vertical changes in soil water content at the Kunast and Yingsu sections

40~120 cm分别为12.88%、0.92%、24.78%。

研究区土壤盐分较高，不同离岸距离下表层土壤电导率变化明显。如图6所示，昆阿斯特断面样地一、二、三0~40 cm土层的电导率分别为754.33 μS·cm^{-1}、731.00 μS·cm^{-1}、249.25 μS·cm^{-1}，表层土壤盐度随离岸距离的增加逐渐降低；英苏断面0~40 cm土层的电导率分别为1393.25 μS·cm^{-1}、894.50 μS·cm^{-1}、509.67 μS·cm^{-1}。

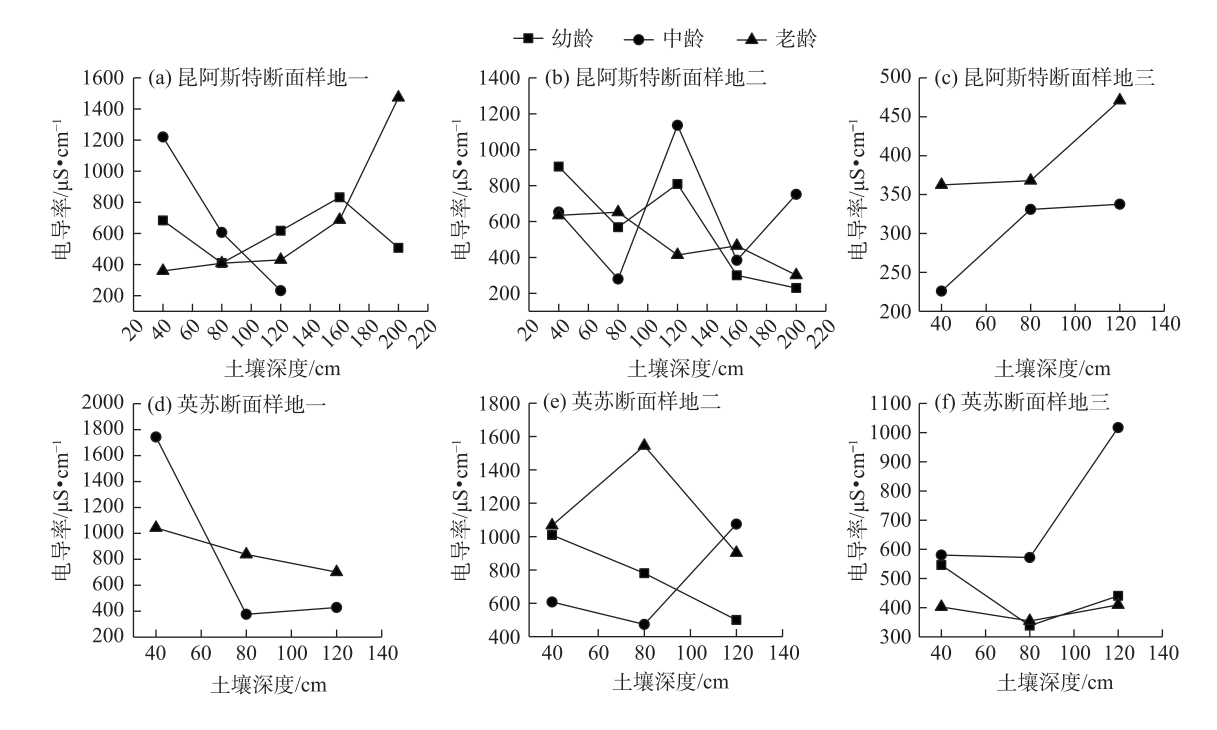


图6 昆阿斯特断面和英苏断面土壤中电导率垂直变化特征

Fig. 6 Characteristics of vertical changes in soil conductivity at the Kunast and Yingsu sections

2.2 土壤水氢氧稳定同位素组成变化特征

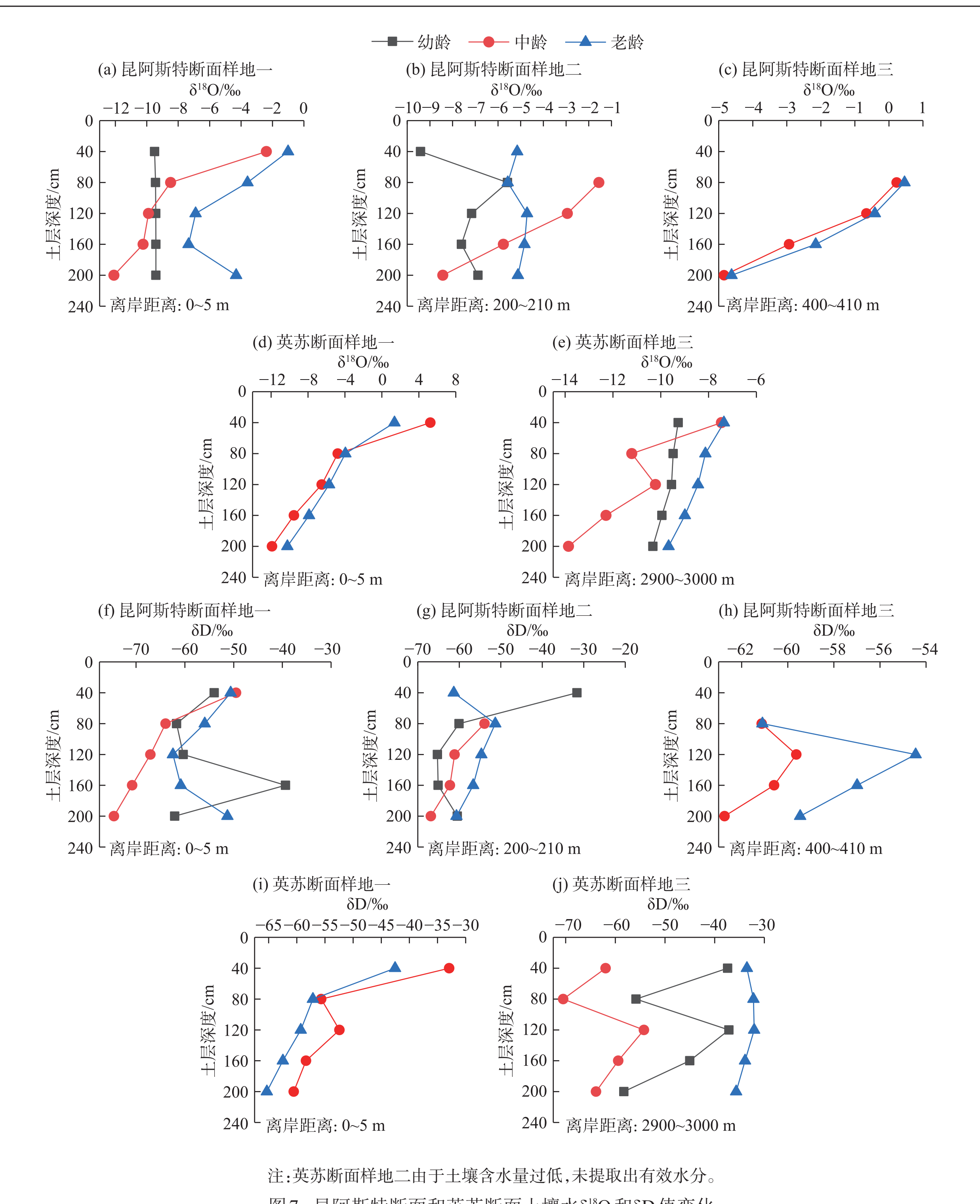
如图7所示，随土壤深度的增加，土壤水δ^{18}O和δD值逐渐减小。昆阿斯特断面δ^{18}O和δD值的变化范围分别为-12.09‰~0.46‰、-74.5‰~-31.6‰，最小值位于样地一中龄胡杨的160~200 cm土层，最大值位于样地三老龄胡杨的40~80 cm土层。英苏断面δ^{18}O和δD值的变化范围分别为-13.86‰~5.25‰、-70.5‰~-32.1‰，最大值位于样地一中龄胡杨的0~40 cm土层和样地三老龄胡杨的80~120 cm土层，最小值位于样地三中龄胡杨160~200 cm土层和中龄胡杨40~80 cm土层。随离岸距离的增加，昆阿斯特断面样地一、二、三的δ^{18}O和δD值变化幅度分别为11.08‰和35.1‰、7.86‰和35.2‰、5.30‰和8.3‰，英苏断面分别为17.15‰和32.4‰、6.50‰和38.4‰。

2.3 木质部水氢氧稳定同位素组成变化特征

如图8所示，昆阿斯特断面木质部水δ^{18}O和δD值的变化范围分别为-15.40‰~-5.79‰、-43.1‰~-21.9‰，最大值出现样地三的老龄和中龄胡杨，最小值位于样地二的中龄胡杨。英苏断面木质部水δ^{18}O和δD值的变化范围分别为-11.21‰~-8.87‰、-31.3‰~-16.5‰，最大值位于样地一、三的中龄胡杨，最小值位于样地二的幼龄胡杨。从不同林龄来看，昆阿斯特断面幼龄胡杨木质部水δ^{18}O和δD值的变化幅度分别为1.97‰和3.50‰，中龄胡杨为7.28‰和21.20‰，老龄胡杨为8.15‰和9.90‰。英苏断面的幼龄胡杨木质部水δ^{18}O和δD值的变化幅度分别为0.22‰和3.20‰，中龄胡杨为1.11‰和12.70‰，老龄胡杨为0.30‰和2.00‰。表现为中龄胡杨木质部水δ^{18}O和δD值变化幅度最大，老龄胡杨次之，幼龄胡杨最小。

2.4 地下水氢氧稳定同位素组成变化特征

地下水氢氧稳定同位素组成随离岸距离越远越贫化。从图9上看，昆阿斯特断面地下水δ^{18}O和δD值变化范围分别为-9.81‰~-9.23‰、-32.70‰~-27.70‰，波动幅度为0.58‰和5.00‰；英苏断面分



注:英苏断面样地二由于土壤含水量过低,未提取出有效水分。

图7　昆阿斯特断面和英苏断面土壤水δ18O和δD值变化

Fig. 7　Changes in δ18O and δD values of soil water at Kunast and Yingsu sections

别为−9.80‰~−9.00‰、−52.20‰~−27.60‰,波动幅度为0.80‰和24.60‰。从不同离岸距离看,昆阿斯特断面地下水δ18O值变化较小,最大值位于DW3,最小值位于DW2,δD值随离岸距离的增加呈现为先增大后减小的趋势,最大值位于DW2,最小值位于DW3;英苏断面地下水δ18O值在Y-F3处达到最大值后逐渐减小,最小值位于Y-F1,δD值随离岸距离的增加而减小,最大值位于Y-F11,最小值位于Y-F6,英苏断面δ18O和δD值变化幅度较大。

2.5　胡杨水分来源及对各潜在水源的利用比例

如图10所示,昆阿斯特断面内不同林龄、不同离岸距离的胡杨各潜在水源贡献比例差异较大。

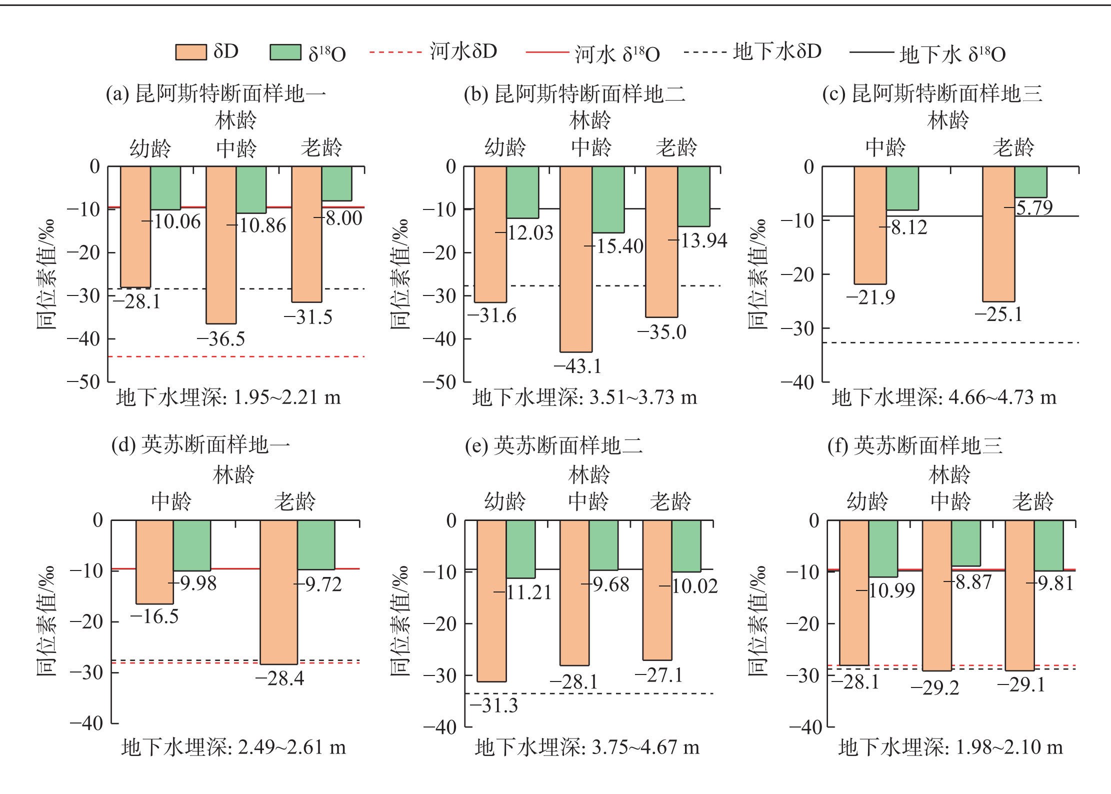
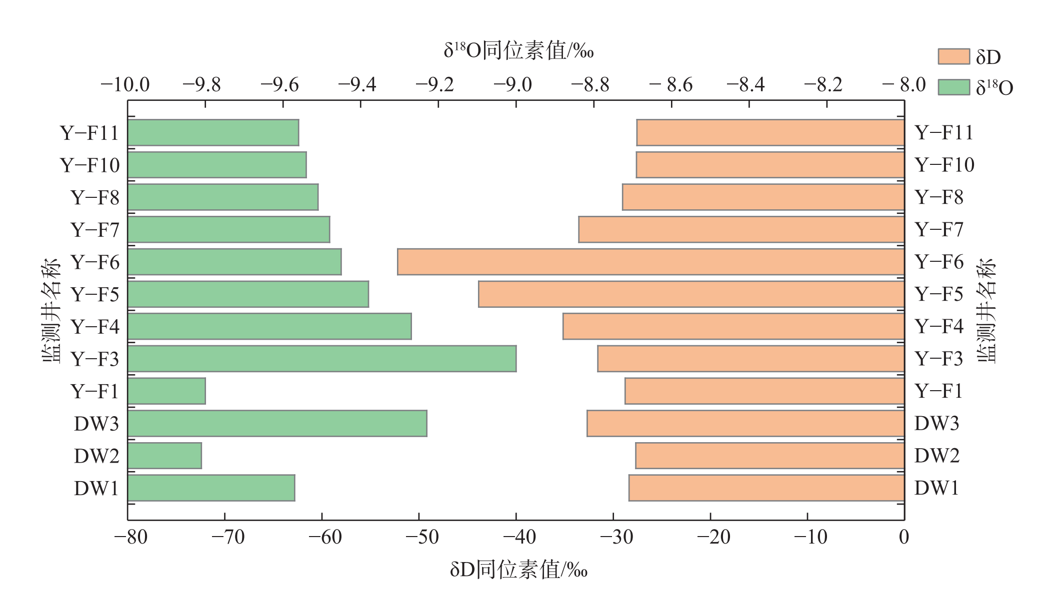


图8 不同林龄胡杨木质部水同位素组成变化

Fig. 8 Variation in water isotope composition of *Populus euphratica* xylem at different stand ages

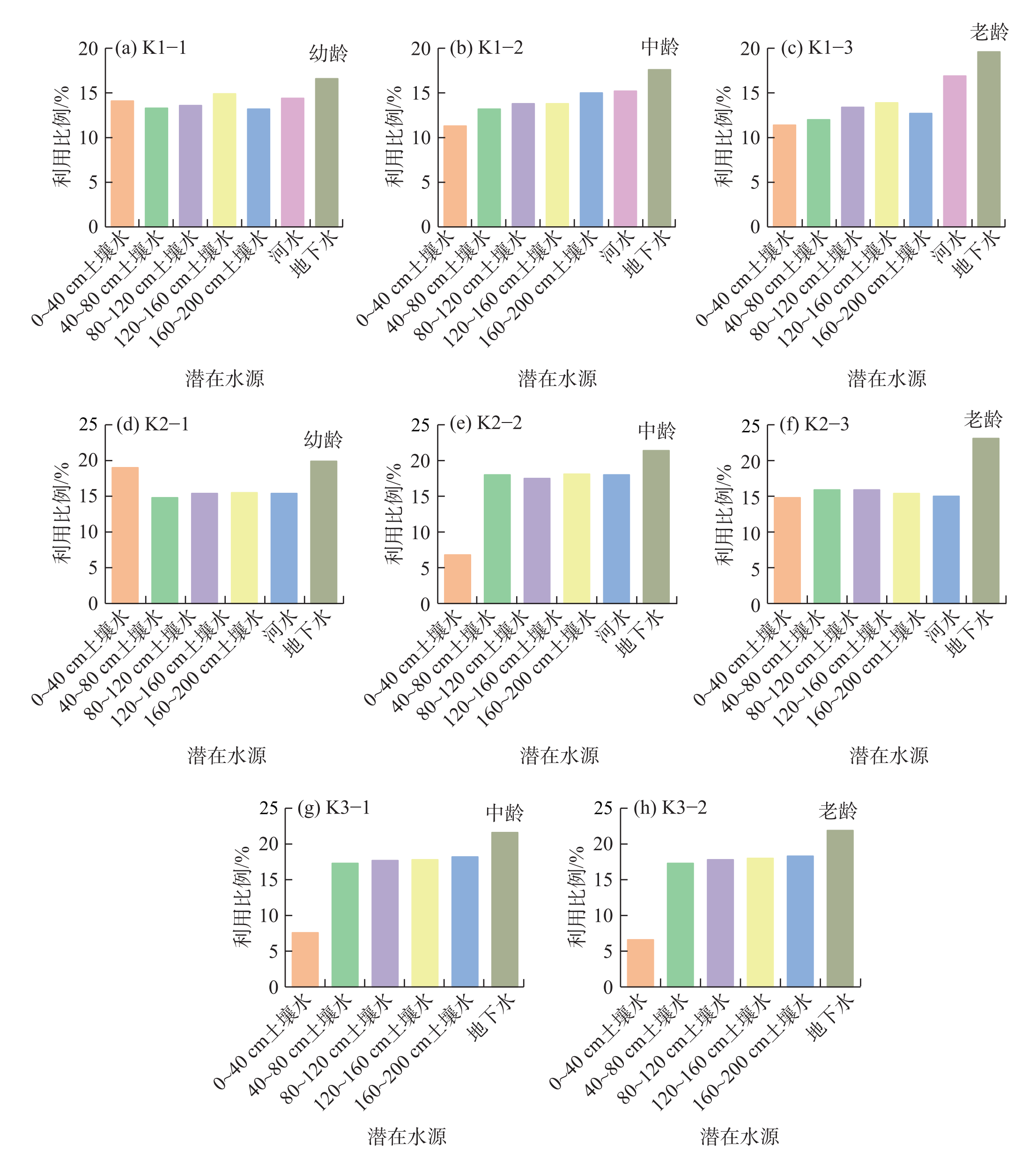


注：DW1~DW3为昆阿斯特断面；Y−F1~Y−F11为英苏断面。

图9 地下水氢氧稳定同位素组成变化特征

Fig. 9 Characterization of hydrogen and oxygen stable isotope variations in groundwater

样地一内幼龄胡杨最大吸水层位为地下水，其次为120~160 cm土壤水和河水，利用比例分别为16.6%、14.9%、14.4%；中龄和老龄胡杨的主要吸水层位为地下水和河水，对地下水的利用比例分别为17.6%和19.6%，对河水的利用比例分别为15.2%和16.9%。样地二幼龄、中龄和老龄胡杨最大吸水层位均为地下水，其利用比例分别为19.9%、21.4%、23.1%，老龄胡杨对地下水的利用比例最高，中龄胡杨次之，幼龄胡杨最低。样地三中龄和老龄胡杨的主要吸水层位为地下水和深层土壤水，对地下水的



注：a~c为样地一，地下水埋深为1.95~2.21 m；d~f为样地二，地下水埋深为3.51~3.73 m；g、h为样地三，地下水埋深为4.66~4.73 m。图中样木编号见表1。

图10　昆阿斯特断面各潜在水源的利用比例变化

Fig. 10　Variation in the proportion of utilization of each potential source of water at the Kunast section

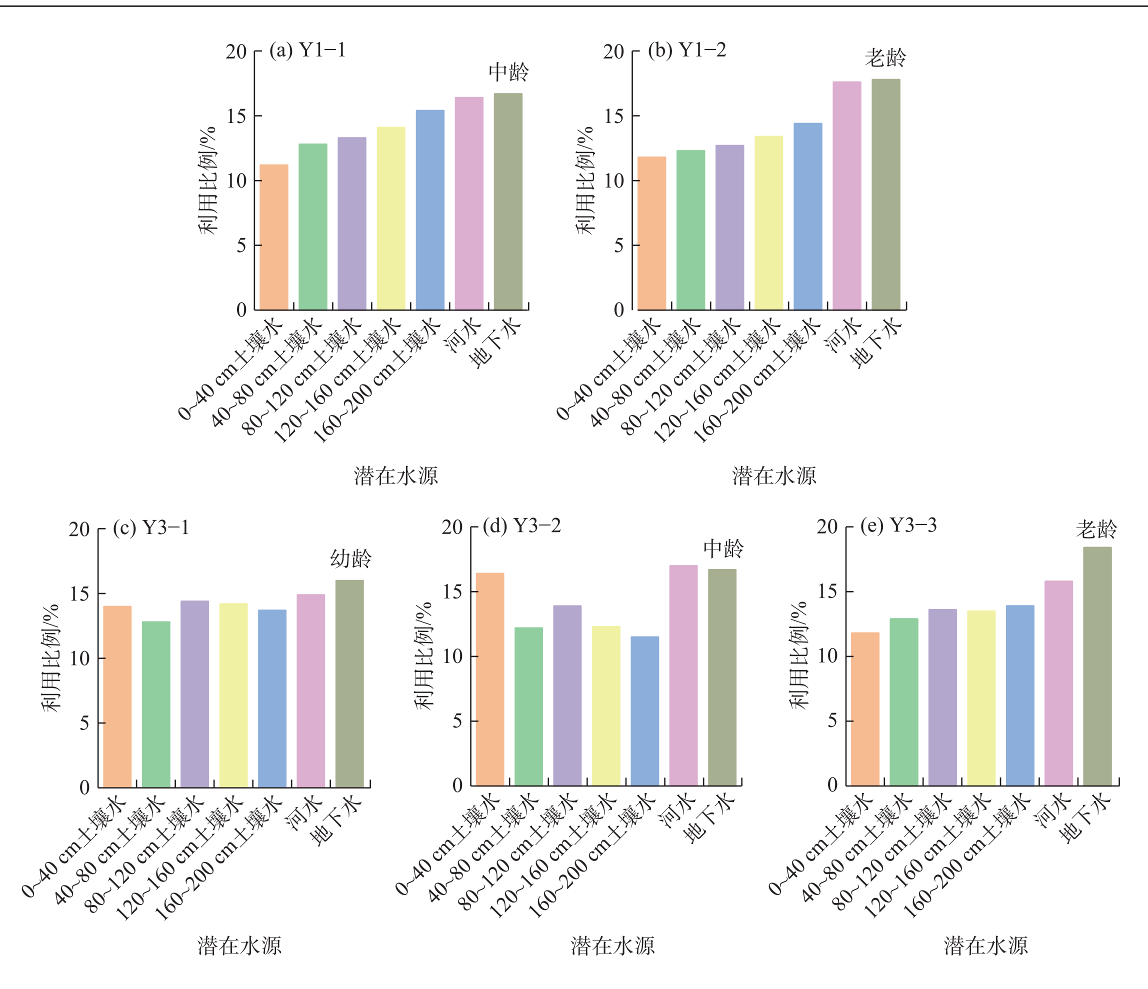
利用比例分别为21.6%和21.9%，对160~200 cm土壤水的利用比例分别为18.2%和18.3%。

如图11所示，英苏断面各样地内不同林龄胡杨的主要吸水层位变化差异较小。样地一内无幼龄胡杨生存，中龄和老龄胡杨的最大吸水层位为地下水，利用比例分别为16.7%和17.8%，其次为河水，利用比例分别为16.4%和17.6%。样地三内幼龄胡杨的最大吸水层位为地下水，其次为河水和80~120 cm土壤水，利用比例分别为16.0%、14.9%、14.4%；中龄胡杨最大吸水层位为河水，其次为地下水和0~40 cm土壤水，利用比例分别为17.0%、16.7%、16.4%；老龄胡杨的最大吸水层位为地下水，其次为河水和160~200 cm土壤水，利用比例分别为18.4%、15.8%、13.9%。

3　讨　论

3.1　不同林龄胡杨水分利用来源对地下水埋深变化的响应

由于实验处理和采样方法等因素的影响，导致模型在量化不同林龄胡杨对潜在水源的利用比例



注：a~b为样地一；c~e为样地三。图中样木编号见表1。

图11 英苏断面各潜在水源的利用比例变化

Fig. 11 Variation in the proportion of utilization of each potential water source at the Yingsu section

时产生误差，因此采用RMSE对模型结果进行评价，计算得出RMSE值为3.34，模型量化结果误差较小。

胡杨是深根系植物，对地下水依赖程度较高[27]。本研究发现，幼龄胡杨从浅层土壤中吸收水分，中龄和老龄胡杨主要利用深层土壤水和地下水，这与刘树宝[12]和张江等[28]研究结果一致。当地下水埋深较浅(1.95~2.21 m)时，不同林龄胡杨的主要吸水层位为地下水和河水；当地下水埋深为3.51~3.73 m时，幼龄胡杨的主要吸水层位为地下水和0~40 cm土壤水，中老龄胡杨主要利用地下水，不同林龄胡杨对地下水的利用比例均较高，可能是由于该样地为试验田区，常有周期性地下水灌溉，以致地下水为胡杨的主要吸水来源；当地下水埋深较深(4.66~4.73 m)时，胡杨可能遭受到干旱胁迫，土壤含水量极低，无幼龄胡杨生存，中老龄胡杨主要利用地下水和深层土壤水，这与周洪华等[29]研究结果一致。并且Chen等[30]指出，当地下水埋深为8 m以上时，胡杨将会出现枯死状况，发生衰败退化。因此维持一定深度的地下水埋深对促进荒漠河岸林的生态恢复极为重要[27]。

并且，本研究发现河岸两旁的胡杨可以直接利用河水，中龄胡杨对河水的利用比例最大，幼龄胡杨次之，老龄胡杨最低，这与李涛等[13]和苏鹏燕等[31]的研究结果一致。

3.2 土壤理化性质对胡杨水分吸收利用的影响

塔里木河下游是极度干旱地区，本研究中土壤表层同位素富集主要是由于蒸发作用引起。当浅层(0~40 cm)土壤含水量较低时，不同林龄胡杨的主要吸水层位为地下水和深层土壤水，与王勇等[32]研究结果一致，胡杨幼苗仅生存于浅层土壤含水量较高的河岸边。

除干旱胁迫外，胡杨还受到盐分胁迫的影响。本研究中胡杨对0~40 cm浅层土壤水的平均利用比例，随着土壤盐度的增加而降低。当土壤电导率为

509.67 μS·cm^{-1}时，不同林龄胡杨对浅层土壤水的平均利用比例较高(14.1%)；土壤电导率为754.33 μS·cm^{-1}时，不同林龄胡杨对浅层土壤水的平均利用比例为12.3%，对盐分含量较高的土层水分吸收比例低，与陈亚鹏等[33]研究结果一致。表明胡杨在含盐量较高的区域，通常选择吸收含盐量较小的深层土壤水、河水和地下水。然而研究区土壤电导率为249.25 μS·cm^{-1}时，不同林龄胡杨对浅层土壤水的利用比例仅为7.1%，原因是该样地浅层土壤含水量仅为0.20%，地下水埋深为4.66~4.73 m，所以除土壤盐度外，土壤含水量过低或地下水埋深较深也会影响胡杨的吸水策略。

因此，本研究对塔里木河下游不同林龄胡杨水分来源进行初步解析，有利于明确不同林龄胡杨吸水策略对地下水埋深变化的响应，将为塔里木河下游生态输水和胡杨群落恢复提供理论基础。但对离岸距离、地下水埋深等未进行细化设定，在今后的研究中需要进一步加强，以对塔河下游胡杨水分来源有更全面的认识。

4 结 论

(1) 随土壤深度增加，土壤水$\delta^{18}O$和δD值逐渐减小；随离岸距离增加，中龄胡杨木质部水$\delta^{18}O$和δD值变化幅度最大，老龄胡杨次之，幼龄胡杨最小；地下水$\delta^{18}O$和δD值随离岸距离的增加而减小。

(2) 不同林龄胡杨对地下水的利用比例随离岸距离的增加而增大，吸水层位逐渐转向更深层土壤水和地下水，老龄胡杨对地下水的利用比例最高，中龄胡杨次之，幼龄胡杨最低。

(3) 不同地下水埋深和土壤理化性质与胡杨的水分利用来源密切相关。地下水埋深为1.95~3.73 m时，不同林龄胡杨主要利用地下水、河水和表层土壤水，地下水埋深为4.66~4.73 m时，中龄和老龄胡杨主要利用地下水和深层土壤水。土壤含水量过低、地下水埋深和土壤盐度过高时，不利于胡杨生存。

参考文献(References)

[1] 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 483-493. [Wang Yujie, Qin Dahe. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of northwest China: An overview[J]. Climate Change Research, 2017, 13(5): 483-493.]

[2] 席本野, 邸楠, 曹治国, 等. 树木吸收利用深层土壤水的特征与机制: 对人工林培育的启示[J]. 植物生态学报, 2018, 42(9): 885-905. [Xi Benye, Di Nan, Cao Zhiguo, et al. Characteristics and underlying mechanisms of plant deep soil water uptake and utilization: Implication for the cultivation of plantation trees[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(9): 885-905.]

[3] 赵玲, 张露, 赵妮, 等. 基于同位素示踪的不同生境果草复合系统水分利用策略[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 86-94. [Zhao Ling, Zhang Lu, Zhao Ni, et al. Water utilization strategies of fruit-grass composite systems in different habitats based on isotope tracing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 86-94.]

[4] 余绍文, 张溪, 段丽军, 等. 氢氧稳定同位素在植物水分来源研究中的应用[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(5): 1-6. [Yu Shaowen, Zhang Xi, Duan Lijun, et al. Application of stable hydrogen and oxygen isotope to the study of plant water use sources[J]. Safety and Environmental Engineering, 2011, 18(5): 1-6.]

[5] Geris J, Tetzlaff D, McDonnell J J, et al. Spatial and temporal patterns of soil water storage and vegetation water use in humid northern catchments[J]. Science of the Total Environment, 2017, 595: 486-493.

[6] 杜勤勤. 基于氢氧稳定同位素的兰州市南北两山植物水分来源研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020. [Du Qinqin. Study on water sources of plant species based on stable oxygen and hydrogen isotopes in the northern and southern mountains of the Lanzhou City[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.]

[7] Dawson T E, Ehleringer J R. Streamside trees that do not use stream water[J]. Nature, 1991, 350(6316): 335-337.

[8] 刘泽琛, 张明军, 张宇, 等. 基于氢氧稳定同位素示踪的侧柏与白榆水源对比[J]. 生态学杂志, 2024, 43(3): 694-700. [Liu Zechen, Zhang Mingjun, Zhang Yu, et al. Comparative study on water sources of *Platycladus orientails* and *Ulmus pumila* based on hydrogen and oxygen stable isotope tracing[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(3): 694-700.]

[9] 李荣磊, 黄来明, 裴艳武, 等. 毛乌素沙地圪丑沟小流域沙柳水分利用来源研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 122-130. [Li Ronglei, Huang Laiming, Pei Yanwu, et al. Water use source of *Salix psammophila* in Gechougou small watershed of Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 122-130.]

[10] Qiu D D, Zhu G F, Bhat M A, et al. Water use strategy of *Nitraria tangutorum* shrubs in ecological water delivery area of the lower inland river: Based on stable isotope data[J]. Journal of Hydrology, 2023, 624: 129918, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129918.

[11] 赵鹏, 徐先英, 姜生秀, 等. 石羊河下游不同衰退程度多枝柽柳灌丛水分利用格局研究[J]. 生态学报, 2022, 42(17): 7187-7197. [Zhao Peng, Xu Xianying, Jiang Shengxiu, et al. Water utili-

zation pattern of *Tamarix ramosissima* Ledeb. Nebkhas with different decline degrees in the lower reaches of Shiyang River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 7187-7197.]

[12] 刘树宝. 基于稳定同位素技术的荒漠河岸林胡杨水分来源研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014. [Liu Shubao. Study on water sources of *Populus euphratica* based on the stable isotope techniques in desert riparian forest[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2014.]

[13] 李涛, 罗光明, 董克鹏, 等. 克里雅河尾闾河岸不同生长阶段胡杨的水分利用[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 989-997. [Li Tao, Luo Guangming, Dong Kepeng, et al. Water use of *Populus euphratica* in different development stages growing near the riverbank at the tail of the Keriya River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4): 989-997.]

[14] 万彦博, 师庆东, 戴岳, 等. 沙漠腹地天然绿洲不同林龄胡杨水分利用来源[J]. 应用生态学报, 2022, 33(2): 353-359. [Wan Yanbo, Shi Qingdong, Dai Yue, et al. Water sources of *Populus euphratica* with different tree ages in the oasis of desert hinterland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(2): 353-359.]

[15] 王玉阳, 陈亚鹏, 李卫红, 等. 塔里木河下游典型荒漠河岸植物水分来源[J]. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1150-1157. [Wang Yuyang, Chen Yapeng, Li Weihong, et al. Water sources of typical desert riparian plants in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(6): 1150-1157.]

[16] Ma X F, Zhu J T, Wang Y, et al. Variations in water use strategies of sand-binding vegetation along a precipitation gradient in sandy regions, northern China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126539, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126539.

[17] 张久丹, 李均力, 包安明, 等. 2013—2020年塔里木河流域胡杨林生态恢复成效评估[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1824-1835. [Zhang Jiudan, Li Junli, Bao Anming, et al. Effectiveness assessment of ecological restoration of *Populus euphratica* forest in the Tarim River Basin during 2013—2020[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1824-1835.]

[18] Zhou H H, Ye Z X, Yang Y H, et al. Drought stress might induce dexual dpatial degregation in dioecious *Populus euphratica*: Insights from long-term water use efficiency and growth rates[J]. Biology, 2024, 13(5): 318, doi: 10.3390/biology13050318.

[19] 王世绩, 陈炳浩, 李护群. 胡杨林[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995: 57-59. [Wang Shiji, Chen Binghao, Li Huqun. *Populus euphratica* forest[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1995: 57-59.]

[20] 郝帅, 李发东. 艾比湖流域典型荒漠植被水分利用来源研究[J]. 地理学报, 2021, 76(7): 1649-1661. [Hao Shuai, Li Fadong. Water sources of the typical desert vegetation in Ebinur Lake Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(7): 1649-1661.]

[21] Schultz N M, Griffis T J, Lee X, et al. Identification and correction of spectral contamination in $^{2}H/^{1}H$ and $^{18}O/^{16}O$ measured in leaf, stem, and soil water[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2011, 25(21): 3360-3368.

[22] Stock B C, Jackson A L, Ward E J, et al. Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models[J]. PeerJ, 2018, 6: e5096, doi: 10.7717/peerj.5096.

[23] Kim S H, Lee D H, Kim M S, et al. Systematic tracing of nitrate sources in a complex river catchment: An integrated approach using stable isotopes and hydrological models[J]. Water Research, 2023, 235: 119755, doi: 10.1016/j.watres.2023.119755.

[24] Wang J, Lu N, Fu B. Inter-comparison of stable isotope mixing models for determining plant water source partitioning[J]. Science of the Total Environment, 2019, 666: 685-693.

[25] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition[J]. Plant, Cell & Environment, 1992, 15(9): 1073-1082.

[26] 曾祥明, 徐宪立, 钟飞霞, 等. MixSIAR和IsoSource模型解析植物水分来源的比较研究[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5611-5619. [Zeng Xiangming, Xu Xianli, Zhong Feixia, et al. Comparative study of MixSIAR and IsoSource models in the analysis of plant water sources[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5611-5619.]

[27] 陈永金, 艾克热木·阿布拉, 张天举, 等. 塔里木河下游生态输水对地下水埋深变化的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 651-658. [Chen Yongjin, Abula Aikeremu, Zhang Tianju, et al. Effects of ecological water conveyance on groundwater depth in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 651-658.]

[28] 张江, 李桂芳, 贺亚玲, 等. 基于稳定同位素技术的塔里木河下游不同林龄胡杨的水分利用来源[J]. 生物多样性, 2018, 26(6): 564-571. [Zhang Jiang, Li Guifang, He Yaling, et al. Water utilization sources of *Populus euphratica* trees of different ages in the lower reaches of Tarim River[J]. Biodiversity Science, 2018, 26(6): 564-571.]

[29] 周洪华, 陈亚宁, 李卫红, 等. 干旱区胡杨光合作用对高温和CO_2浓度的响应[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 2797-2810. [Zhou Honghua, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Photosynthesis of *Populus euphratica* olive and its response to CO_2 concentration and high temperature in arid environment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 2797-2810.]

[30] Chen Y, Li W, Zhou H, et al. Experimental study on water transport observations of desert riparian forests in the lower reaches of the Tarim River in China[J]. International Journal of Biometeorology, 2017, 61: 1055-1062.

[31] 苏鹏燕, 张明军, 王圣杰, 等. 基于氢氧稳定同位素的黄河兰州段河岸植物水分来源[J]. 应用生态学报, 2020, 31(6): 1835-1843. [Su Pengyan, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Water sources of riparian plants based on stable hydrogen and oxygen isotopes in Lanzhou section of the Yellow River, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6): 1835-1843.]

[32] 王勇, 赵成义, 王丹丹, 等. 塔里木河流域不同林龄胡杨与柽柳

的水分利用策略研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 157−163. [Wang Yong, Zhao Chengyi, Wang Dandan, et al. Water use strategies of *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* at different ages in Tarim River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 157−163.]

[33] 陈亚鹏, 周洪华, 朱成刚. 塔里木河下游胡杨水分传输过程研究综述[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 612−619. [Chen Yapeng, Zhou Honghua, Zhu Chenggang. A review of water transport processes of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 612−619.]

Water utilization sources of *Populus euphratica* under different groundwater depths in the lower Tarim River

JIANG Xiaoqing[1,2], HAO Shuai[1,2], YE Mao[1,2], HE Dingxue[1,2], ZHANG Zihan[1,2], LI Guohua[1,2]

(1. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China)

Abstract: Groundwater and soil water are critical determinants of desert vegetation growth in arid zones, and the water utilization patterns of desert vegetation are integral to the ecohydrological processes in these regions. To enhance the understanding of water utilization by desert vegetation, this study employed the hydrogen and oxygen stable isotope tracer technique, combined with MixSIAR, to investigate the water absorption sources of *Populus euphratica* across different forest ages and varying groundwater burial depths. The findings revealed the following: (1) Soil water $\delta^{18}O$ and δD values decreased with increasing soil depth and increased with greater distance from the shore. Xylem water $\delta^{18}O$ and δD values exhibited the highest variability in middle-aged trees, followed by old trees and young trees. Groundwater $\delta^{18}O$ and δD values decreased with increasing distance from the shore. (2) The primary water source for *Populus euphratica* across different forest ages and groundwater burial depths was groundwater, followed by deep soil water. *Populus euphratica* located near the riverbank could directly utilize river water. When groundwater burial depths were 1.98−2.10 m, 1.95−2.21 m, 2.49−2.61 m, 3.51−3.73 m, and 4.66−4.73 m, the proportion of groundwater utilization was highest in old trees, accounting for 18.4%, 19.6%, 17.8%, 23.1%, and 21.9%, respectively. Middle-aged trees exhibited slightly lower utilization rates of 16.7%, 17.6%, 16.7%, 21.4%, and 21.6%, while young trees showed the lowest utilization rates of 16.0%, 16.6%, and 19.9% (no seedlings were observed in areas with groundwater burial depths of 2.49−2.61 m and 4.66−4.73 m). (3) Groundwater burial depth increased with distance from the riverbank, whereas soil water content and salinity decreased with distance from the riverbank and increased with soil depth. The proportion of water utilized by *Populus euphratica* increased with soil water content and salinity. Investigating the water utilization sources of *Populus euphratica* under varying groundwater burial depths provides theoretical support for the ecological restoration of desert riparian forests in the lower Tarim River, Xinjiang, China.

Key words: hydrogen and oxygen stable isotopes; MixSIAR model; water source; groundwater burial depth; *Populus euphratica*; lower Tarim River